第40卷 第8期
2023年8月

干 旱 区 研 究
ARID ZONE RESEARCH

Vol. 40 No. 8
Aug. 2023

宁夏六盘山区地面雨滴谱特征统计分析

马思敏[1,2]， 舒志亮[1,2]， 常倬林[1,2]， 周 楠[1,2]， 刘士军[3]

（1. 中国气象局旱区特色农业气象灾害监测预警与风险管理重点实验室，宁夏 银川 750002；2. 宁夏回族自治区气象灾害防御技术中心，宁夏 银川 750002；3. 乌海市气象局，内蒙古 乌海 016000）

摘 要：利用2020—2021年六盘山区58次降雨过程不同站点的雨滴谱数据，对层状云、对流云、积层混合云三类降雨的微物理参量、雨滴谱平均特征，以及Gamma分布参数等进行了分析。结果表明：（1）同一站点的各微物理参量以及特征直径均值表现为：对流云>积层混合云>层状云；在层状云和积层混合云中，平均直径D_{ave}、众数直径D_{mode}表现为山腰大于山顶和山底，随着东、西坡两侧海拔高度的升高，其最大直径D_{max}、质量加权平均直径D_m、雨强R、雷达反射率Z、液态含水量Q逐渐增大；（2）层状云和积层混合云小雨滴对雨强和数浓度的贡献均为最大，对流云小雨滴对数浓度贡献最大，而中等雨滴对雨强的贡献最大；（3）Gamma分布的参数N_0（阶距参数）、μ（形状参数）、λ（斜率参数）随着海拔高度的升高而减小，μ-λ拟合曲线的斜率与降水类型密切相关；（4）山顶站点雨滴粒子数浓度N_w较山脚站点有所减小，而平均尺度D_m增大；（5）西北气流型的雨滴谱各特征直径参量及各微物理参量大于东高西低型和平直气流型。

关键词：六盘山；雨滴谱；微物理特征；Gamma分布

雨滴是云中动力过程、微物理过程以及多种因素综合作用的结果，是云降水宏、微观过程的最终产物。雨滴谱（Raindrop Size Distributions，简称RSD）是单位体积内雨滴的数浓度随其直径大小的分布。云中水凝物粒子经过一系列复杂过程后，形成雨滴降落到地面，雨滴谱的谱型特征以及相关微物理参量可以反映出降水的微物理特征[1]。通过研究雨滴谱分布，对深入认识自然降水过程的形成机制，评估人工增雨潜力和效果检验，以及指导人工影响天气作业均有重要意义，也对改进雷达定量估测降水准确性具有重要价值[2-3]。因此，雨滴谱特征是研究云和降水形成微物理机制最重要的内容之一。

雨滴谱分布的概念最早由Marshall and Palmer于1948年提出，他们认为指数方程可较好地描述雨滴大小和浓度的分布情况（简称M-P分布）[4]。后来，Ulbrich在1983年指出，M-P分布在描述大雨滴和小雨滴的分布上与真实的降水特征相比存在较大的差异，于是他提出了三参数的Gamma分布模型[5]，该模型增加了形状参数μ，可以更好地描述小雨滴的变化情况。大量研究表明，与M-P分布相比，Gamma分布能更好地表征积层混合云与积状云降水的雨滴谱分布特征[2,6-8]。

近年来，我国学者利用地面激光雨滴谱仪开展了大量研究，不同地区、不同降水类型、不同海拔高度、不同天气系统的雨滴谱特征存在显著的差异。如牛生杰等[9]研究了1984—1986年宁夏不同地区、不同环流形势下的雨滴谱特征差异；张玉欣[10]等研究了祁连山南麓夏季对流云和层状云降雨滴谱特征，发现相同尺度的对流云降雨粒子下落速度略大于层状云；王昀等[11]分析了天山三类降雨的微物理结构特征，分析由于山区地形作用，天山地区降雨的小雨滴浓度高，且雨滴尺度小，增雨潜力大。通过在山体不同高度布设地面雨滴谱仪，可以获得降

收稿日期：2023-01-18； **修订日期：**2023-05-11
基金项目：宁夏回族自治区重点研发计划（2022BEG02010）；国家自然科学基金联合基金项目（U22A202286）；第二次青藏高原综合科学考察研究项目（2019QZKK0104）；中国气象局旱区特色农业气象灾害监测预警与风险管理重点实验室开放研究项目（CAMF-202207）共同资助
作者简介：马思敏（1991-），女，工程师，研究方向为大气物理. E-mail: msm053@163.com
通讯作者：舒志亮. E-mail: 8633204@163.com

水微物理特征在不同高度上的差异；李慧等[12]的研究表明，黄山层状云相比于对流云，雨滴谱随高度的变化较为稳定，山腰位置的雨滴尺度大于山顶和山底，可能与各观测点相对云底的不同位置有关；陈聪等[13]也在黄山地区的一次降水过程中发现相同的规律；张昊等[14]在庐山的观测研究发现，直径小于1 mm的小雨滴在海拔较高处占比较大，而相同尺度的雨滴在海拔较低处下落末速度较大；程鹏等[15]分析了祁连山一次层状云降水地面雨滴谱资料发现，高海拔站点的雨滴直径小且浓度大；李山山等[16]发现，随着青藏高原东坡的海拔增高，弱降水的雨滴粒子数浓度增大，而平均直径减小，强降水的雨滴粒子数浓度减小，而平均直径快速增大。

六盘山是全国为数不多的近南北走向的狭长山地，其主峰海拔2942 m，山地东坡陡峭，坡度26°~60°，西坡和缓，坡度20°~35°，为气流在连续山脉的传播以及云降水物理过程的研究提供了有利条件。六盘山区是我国西北地区的主要水源涵养地[17]，该地区750 hPa以下以东南暖湿气流为主导，该气流在受到六盘山东坡的地形抬升后上升凝结，形成深厚云层[18]。对于六盘山地区，陶涛等[19]利用地面激光雨滴谱仪分析了一次强对流天气降雹过程的微物理特征；曹宁等[20]利用微雨雷达对比分析了六盘山区对流云、层状云、浅积云及其降水微物理特征。前人在对六盘山区的降水微物理特征的研究方面，缺乏连续观测资料的平均特征分析研究，对不同地形位置的雨滴谱特征差异研究较少，本文利用六盘山区2020—2021年观测降雨期间的雨滴谱资料，探讨该地区不同类型、不同位置降水的微物理参量、雨滴谱平均特征和Gamma分布参数及其关系等，旨在揭示该地区地面降雨微物理特征，对探究六盘山地形云降雨的发生发展规律和形成机理有积极意义。

1 设备、资料和方法

1.1 设备和资料介绍

本文选取在六盘山大气科学野外试验基地布设的5部DSG5型激光雨滴谱仪（常年观测），图1为仪器具体地理位置示意图，表1为观测站点基本信息。DSG5型激光雨滴谱仪观测原理是基于降水粒子对激光衰减的原理，它共有32个非等间距直径通道和32个非等间距速度通道，降水粒子直径测量范围为0.2~25 mm，速度测量范围为0.2~20 m·s^{-1}，具体参数见表2。已有研究表明，通过对其标定、监测，其误差范围在±20%以内[21]。

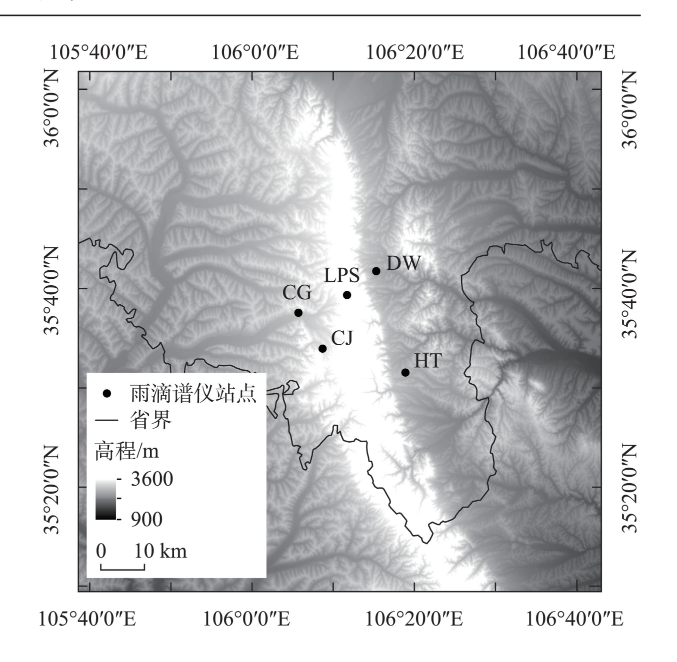


图1 野外试验位置示意图

Fig. 1 Location diagram of field experiment

表1 六盘山大气科学野外试验基地DSG5型激光雨滴谱仪观测站点信息

Tab. 1 Observation site information of DSG5 laser raindrop spectrometer in Liupanshan atmospheric science field experiment base

站点名	经度	纬度	海拔/m
六盘山站(LPS)	106.20°E	35.66°N	2845.2
陈靳站(CJ)	106.15°E	35.57°N	2254.0
城关站(CG)	106.10°E	35.63°N	2284.0
大湾站(DW)	106.26°E	35.70°N	1952.4
惠台站(HT)	106.32°E	35.53°N	1985.0

表2 DSG5型激光雨滴谱仪主要技术参数

Tab. 2 The main specifications of the DSG5

参数	范围
测量区域	54 cm^2
时间分辨率	60 s
粒径范围	0.2~25 mm
速度范围	0.2~20 m·s^{-1}
雨强范围	0.001~999.999 mm·h^{-1}

本文挑选2020—2021年5个雨滴谱仪站点完整观测的58次降雨过程数据，利用位于六盘山气象站（106.2°E，35.68°N，海拔2860 m）的新一代多普勒

天气雷达以及卫星云图资料，对降雨类型进行了分类，包括6次层状云降雨（S）、14次对流云降雨（C）和38次积层混合云降雨（SC）过程，挑选的降雨个例经数据质控后各站降水持续时间均＞30 min，由于对流云降水具有局地性，故挑选对流云降水个例的标准为3个以上雨滴谱站点观测到降水的个例。个例开始时间和结束时间分别是5个雨滴谱仪站点中最早和最晚观测到降水粒子的时间，具体降水个例见表3。

此外，还根据六盘山区上空500 hPa气流场，将58次降雨过程分成东高西低型、西北气流型和平直气流型，其中东高西低型36次，占比最多，为60%，西北气流型为18次，占比32%，平直气流型为4次，占比最少，为7%。层状云和积层混合云中东高西低型占比最多，分别为83%和68%，而对流云西北气流型占比最多，为64%。

1.2 数据质量控制

受灵敏度和采样面积等因素的限制，激光雨滴谱仪资料应进行数据质量控制。由于前两个尺度通道（0.05~0.25 mm）的雨滴直径很小，很容易受到湍流和地面飞溅的影响，信噪比较低不可用[22]，直径＞8 mm的雨滴在自然界基本不存在[3]，所以在进行数据质量控制时剔除前两个尺度档和雨滴直径＞8 mm的数据，考虑到潜在的非降水样本，删除雨滴总数<10或雨强<0.01 mm·h^{-1}的样本数据。此外，为了消除大雨滴在仪器探测范围边缘被识别为速度过快的小雨滴，以及在强风环境下缓慢下降的大雨滴等带来的误差，采用Atlas等[23]提出的粒子下落

表3 选取的2020—2021年降雨个例

Tab. 3 Selected rainfall cases from 2020 to 2021

序号	云类	个例起止时间	序号	云类	个例起止时间
1	S	2020-05-13 T 03:30—11:38	30	SC	2020-08-04 T 04:18—2020-08-06 T 17:47
2	S	2020-09-25 T 00:40—2020-09-26 T 04:18	31	SC	2020-08-10 T 02:32—2020-08-12 T 16:28
3	S	2020-09-27 T 11:34—2020-09-28 T 18:13	32	SC	2020-08-14 T 08:44—2020-08-17 T 23:21
4	S	2020-09-30 T 06:26—2020-10-01 T 17:22	33	SC	2020-08-22 T 19:46—2020-08-23 T 17:47
5	S	2020-10-08 T 02:14—06:43	34	SC	2020-08-29 T 16:57—2020-08-30 T 18:47
6	S	2021-04-19 T 13:30—2021-04-20 T 20:27	35	SC	2020-09-09 T 01:42—22:00
7	C	2020-07-05 T 16:04—17:48	36	SC	2020-09-13 T 01:44—2020-09-14 T 02:23
8	C	2020-08-25 T 17:46—20:57	37	SC	2020-09-16 T 17:00—2020-09-17 T 00:38
9	C	2020-09-01 T 12:58—18:55	38	SC	2020-09-21 T 05:19—15:30
10	C	2020-09-03 T 16:33—18:08	39	SC	2020-10-02 T 01:35—12:02
11	C	2021-05-02 T 11:00—16:33	40	SC	2021-04-23 T 03:53—2021-04-24 T 14:00
12	C	2021-05-19 T 13:40—16:19	41	SC	2021-05-14 T 07:39—2021-05-15 T 19:31
13	C	2021-06-06 T 19:18—22:24	42	SC	2021-05-22 T 13:18—22:16
14	C	2021-06-28 T 12:16—15:43	43	SC	2021-06-14 T 01:57—2021-06-17 T 19:31
15	C	2021-06-30 T 15:06—17:45	44	SC	2021-06-30 T 20:08—2021-07-02 T 10:49
16	C	2021-07-07 T 13:55—18:22	45	SC	2021-07-14 T 21:32—2021-07-15 T 17:12
17	C	2021-07-12 T 15:20—16:47	46	SC	2021-07-25 T 15:07—2021-07-26 T 16:54
18	C	2021-07-16 T 10:41—15:53	47	SC	2021-08-12 T 14:36—23:08
19	C	2021-09-08 T 19:45—21:30	48	SC	2021-08-16 T 17:10—2021-08-19 T 17:30
20	C	2021-09-19 T 12:25—18:21	49	SC	2021-08-25 T 09:38—23:27
21	SC	2020-05-06 T 18:52—2020-05-07 T 04:37	50	SC	2021-08-30 T 07:15—2021-08-31 T 14:51
22	SC	2020-05-26 T 10:24—18:24	51	SC	2021-09-02 T 23:48—2021-09-03 T 18:18
23	SC	2020-06-01 T 05:25—18:24	52	SC	2021-09-05 T 11:47—18:52
24	SC	2020-06-07 T 09:30—2020-06-08 T 14:43	53	SC	2021-09-14 T 06:30—2021-09-15 T 20:31
25	SC	2020-06-11 T 05:00—14:50	54	SC	2021-09-17 T 08:26—2021-09-18 T 17:15
26	SC	2020-06-15 T 03:34—2020-06-17 T 14:41	55	SC	2021-09-22 T 09:24—21:50
27	SC	2020-06-22 T 03:10—09:05	56	SC	2021-09-24 T 07:00—2021-09-25 T 18:30
28	SC	2020-06-25 T 17:18—2020-06-26 T 13:45	57	SC	2021-09-27 T 13:08—19:22
29	SC	2020-07-14 T 00:50—19:45	58	SC	2021-10-02 T 23:48—2021-10-06 T 08:15

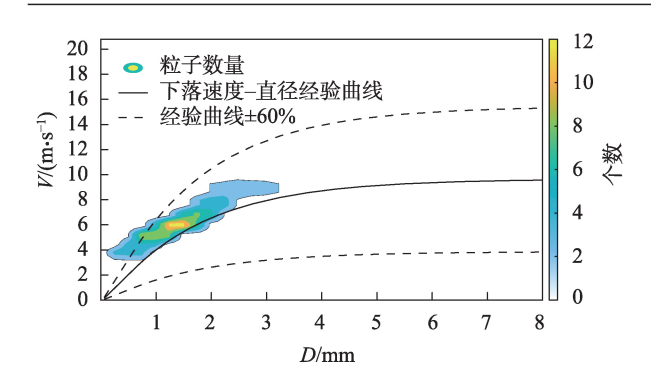


图2 雨滴谱数据质量控制示意图

Fig. 2 Quality control of the disdrometer data derived

速度—直径经验公式，滤除了超过该经验公式±60%的奇异数据。图2为雨滴谱数据质控示意图。

1.3 微物理参量和Gamma谱参数计算

经过数据质控后，通过计算公式可以反演得到各微物理参量。单位体积、单位尺度间隔的雨滴谱数浓度$N(D_i)$计算公式如下：

$$N(D_i)=\sum_{j=1}^{32}\frac{n_{ij}}{A_i\cdot\Delta t\cdot V_j\cdot\Delta D_i} \quad (1)$$

式中：n_{ij}表示第i个尺度档、第j个速度档的雨滴个数；A_i表示雨滴谱仪有效采集面积(m^2)；Δt表示采样间隔(s)，DSG5型激光雨滴谱仪采样间隔为60 s；D_i表示第i尺度档的中值直径(mm)；ΔD_i表示对应的直径间隔(mm)；V_j表示第j档雨滴的下落末速度($m\cdot s^{-1}$)。由此，可以反演得到雨滴数浓度N(m^{-3})、雨强R($mm\cdot h^{-1}$)、液态含水量Q($g\cdot m^{-3}$)、雷达反射率因子Z($mm^{-6}\cdot m^{-3}$)、质量加权平均直径D_m(mm)、广义截距参数N_w($m^{-3}\cdot mm^{-1}$)等降水微物理参量，其中，ρ_w表示水的密度($g\cdot cm^{-3}$)。具体公式如下：

$$N=\sum_{i=1}^{32}N(D_i)\Delta D_i \quad (2)$$

$$R=6\pi\times10^{-4}\cdot\sum_{i=1}^{32}\sum_{j=1}^{32}D_i^3\frac{n_{ij}}{A_i\cdot\Delta t} \quad (3)$$

$$Q=\frac{\pi\rho_w}{6000}\sum_{j=1}^{32}(D_i)D_i^3\Delta D_i \quad (4)$$

$$Z=\sum_{i=1}^{32}D_i^6N(D_i)\Delta D_i \quad (5)$$

$$D_m=\frac{\sum_{j=1}^{32}N(D_i)\cdot D_i^4\cdot\Delta D_i}{\sum_{i=1}^{32}N(D_i)\cdot D_i^3\cdot\Delta D_i} \quad (6)$$

$$N_w=\frac{4^4}{\pi\rho_w}\left(\frac{10^3Q}{D_m^4}\right) \quad (7)$$

本文采用Gamma分布模型拟合实际雨滴谱浓度$N(D)$：

$$N(D)=N_0D^{\mu}\exp(-\lambda D) \quad (8)$$

式中：D表示雨滴等效直径(mm)；N_0表示截断参数($mm^{-1-\mu}\cdot m^{-3}$)；μ表示形状参数，主要用于描述小雨滴的变化；λ表示斜率参数(mm^{-1})。目前，应用阶距估计法估计N_0、μ、λ这三个参数较为常见[12-13,24]。采用阶距法估计Gamma分布的以上三个参数，引入n阶距定义为：

$$M_n=\int_0^{\infty}D^nN(D)dD=N_0\frac{\Gamma(\mu+n+1)}{\lambda^{\mu+n+1}} \quad (9)$$

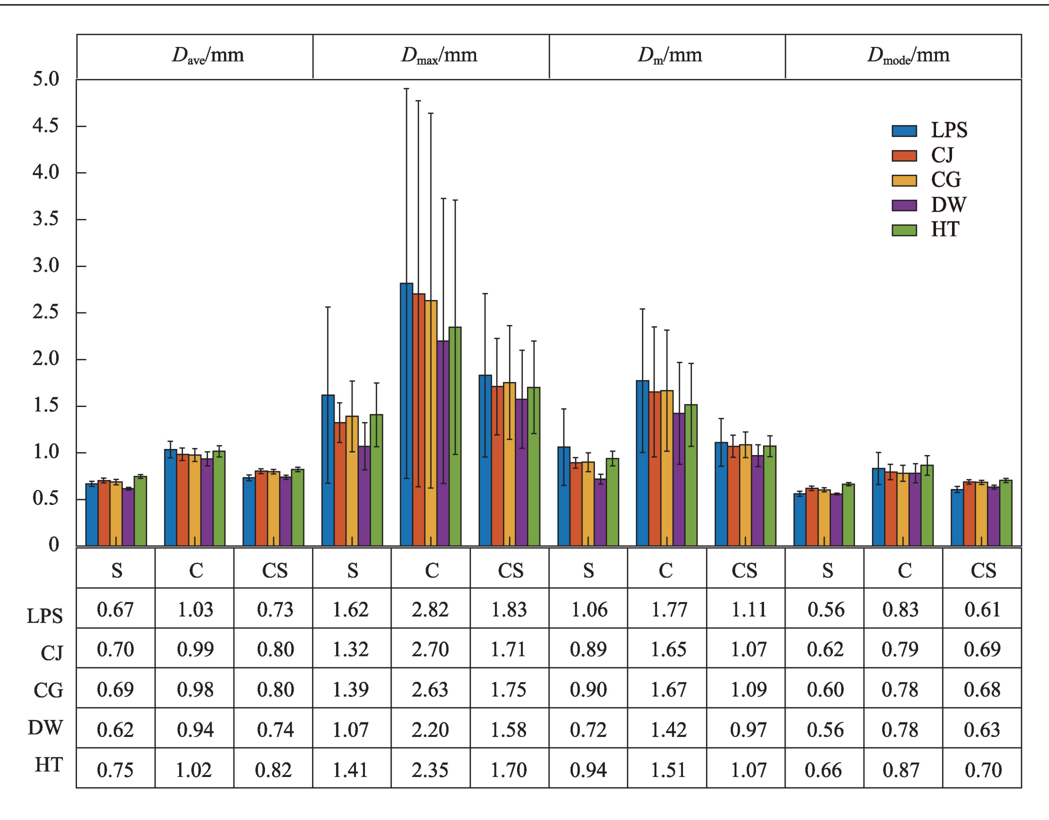
式中：n表示阶数；$N(D)$表示单位空间体积、单位尺度间隔的雨滴数浓度($m^{-3}\cdot mm^{-1}$)。本文利用黄兴友等[24]的3、4、6阶距法，计算N_0、μ、λ三个参数。

2 结果与分析

2.1 不同降水性质的雨滴谱微物理参量特征

山区的降水特征与海拔高度有较好的相关性[25-26]。六盘山属于近南北走向的狭长山脉，西坡缓，东坡陡，六盘山站为山顶站，海拔最高，陈靳和城关站为西坡站点，平均海拔为2269 m，大湾和惠台站为东坡站点，平均海拔为1968 m，东坡海拔较西坡更低。

雨滴微物理参量能反映出降水的基本特征，分析雨滴各特征直径(图3)可以看出：同一位置处，对流云降雨的各特征直径均值最大，层状云最小，积层混合云居中，各站D_{mode}平均值差异最小，分别为层状云0.6 mm、积层混合云0.66 mm、对流云0.81 mm，各站D_{max}平均值差异最大，分别为层状云1.36 mm、积层混合云1.71 mm、对流云2.54 mm。在层状云和积层混合云降雨中，六盘山站点的D_{mode}最小，与D_{mode}最大的惠台站点偏小0.1 mm，但其D_{max}、D_m是各站中最大的，比D_{max}、D_m均为最小的大湾站点分别大0.21 mm、0.12 mm，说明山顶小雨滴数量多，而雨滴的平均尺度也较大，考虑是因为山顶距离云底更近或者可能在云中，水汽充沛，雨滴的蒸发、破碎过程不明显。西坡的陈靳和城关站点的各特征直径均值比较接近，相差在0.01~0.07 mm之间，东坡惠台站点的D_{ave}和D_{mode}最大，大湾站点较其他站点来说，各特征直径较小，考虑是由于大湾站点海拔最低，雨滴在下落过程中破碎和蒸发作用明显，且其位于山体最北端，水汽输送条件较差，导致雨滴直径较小，大湾站点2020—2021年累计降水小于其他各站点，由此得出，D_{ave}和D_{mode}为山顶和山底较小，山腰则



	D_{ave}/mm			D_{max}/mm			D_{m}/mm			D_{mode}/mm		
	S	C	CS	S	C	CS	S	C	CS	S	C	CS
LPS	0.67	1.03	0.73	1.62	2.82	1.83	1.06	1.77	1.11	0.56	0.83	0.61
CJ	0.70	0.99	0.80	1.32	2.70	1.71	0.89	1.65	1.07	0.62	0.79	0.69
CG	0.69	0.98	0.80	1.39	2.63	1.75	0.90	1.67	1.09	0.60	0.78	0.68
DW	0.62	0.94	0.74	1.07	2.20	1.58	0.72	1.42	0.97	0.56	0.78	0.63
HT	0.75	1.02	0.82	1.41	2.35	1.70	0.94	1.51	1.07	0.66	0.87	0.70

注:D_{ave}为平均直径(mm),D_{max}为最大直径(mm),D_m为质量加权平均直径(mm),D_{mode}为众数直径(mm);LPS表示六盘山站,CJ表示陈靳站,CG表示城关站,DW表示大湾站,HT表示惠台站;S表示层状云降雨,C表示对流云降雨,SC表示积层混合云降雨。下同。

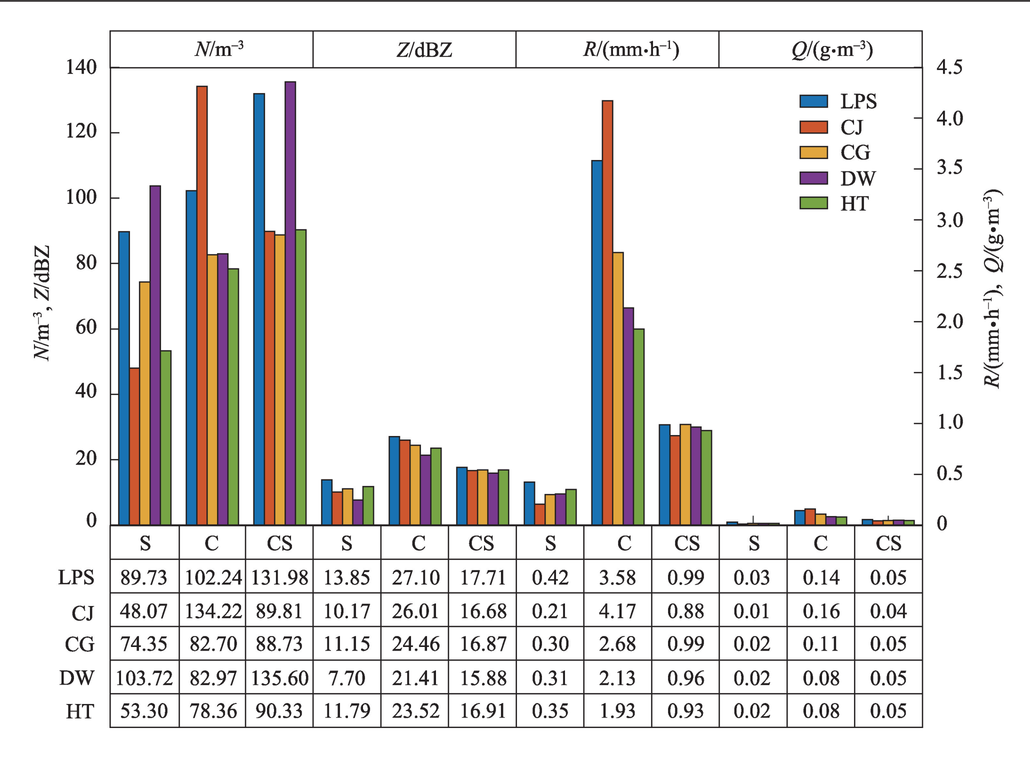
图3 不同云系降水粒子各直径统计特征

Fig. 3 Values of diameter parameters for raindrop spectra at different rainfall events

较大,而D_{max}、D_m为随着海拔升高而增大,这与对黄山的研究结论不完全一致[12-13],这可能是由于黄山山顶至山底站点海拔高度相差(1396 m)较大,而六盘山区各站点海拔高度最大相差892 m。在对流云降雨中,六盘山站点的各特征直径均为最大,西坡的陈靳和城关站点各特征直径相当,相差在0.01~0.07 mm之间,东坡惠台站点的D_{ave}和D_{mode}比陈靳、城关的大,而D_{max}比陈靳、城关站小,大湾站点的各特征直径均为最小,对流云局地性较强,各特征直径统计与海拔高度的相关性和层状云、积层混合云有差异。

由图4分析得出,各站点的微物理参量(数浓度N、雷达反射率Z、液态含水量Q、雨强R)均为:对流云>积层混合云>层状云,各站点R平均值分别为层状云0.32 mm·h^{-1}、积层混合云0.95 mm·h^{-1}、对流云2.9 mm·h^{-1};在层状云和积层混合云降雨中,海拔最低的大湾站点的N最大,为103.7 m^{-3},其次是山顶的六盘山站点,为89.7 m^{-3},陈靳站点数浓度最小,为48.1 m^{-3},可以看出,雨滴数浓度山顶和山底的较大,山腰较小;六盘山站点的R、Z较其他站点大,比R、Z最小的站点分别大0.21 mm·h^{-1}和6.15 dBZ,随着海拔高度的升高,东、西坡两侧的R、Z、Q逐渐增大;对流云降雨局地性较强,5个站点同时出现降雨的个例占57%,西坡陈靳站点R、N、Q均为最大,山顶六盘山站点的雷达反射率Z最大,东坡两个站点的Q、R、Z均比西坡两个站点小,各微物理量统计特征与海拔高度的相关性和层状云、积层混合云不一致。

为了更好地研究雨滴尺度分布对降雨微物理参量的贡献,将雨滴按直径大小分为4类,第一类:D<1 mm,第二类:1 mm<D<2 mm,第三类:2 mm<D<3 mm,第四类:D>3 mm,分别计算各类雨滴对数浓度N和雨强R的贡献。图5是不同云系降雨过程中各类雨滴的贡献,层状云和积层混合云结果比较相似,小雨滴占比最多,各站点的第一类小雨滴对数浓度的贡献均超过了80%,其中山顶六盘山和西坡陈靳站点占比较大,东坡惠台站点占比最小,第一类小雨滴对雨强的贡献也是最大的,均超过了50%;中等雨滴(第二类和第三类)积层混合云占比高于层状云降雨;第三类大雨滴六盘山站点占比最大,这也是其最大直径D_{max}、质量加权平均直径D_m大



	N/m⁻³			Z/dBZ			R/(mm·h⁻¹)			Q/(g·m⁻³)		
	S	C	CS	S	C	CS	S	C	CS	S	C	CS
LPS	89.73	102.24	131.98	13.85	27.10	17.71	0.42	3.58	0.99	0.03	0.14	0.05
CJ	48.07	134.22	89.81	10.17	26.01	16.68	0.21	4.17	0.88	0.01	0.16	0.04
CG	74.35	82.70	88.73	11.15	24.46	16.87	0.30	2.68	0.99	0.02	0.11	0.05
DW	103.72	82.97	135.60	7.70	21.41	15.88	0.31	2.13	0.96	0.02	0.08	0.05
HT	53.30	78.36	90.33	11.79	23.52	16.91	0.35	1.93	0.93	0.02	0.08	0.05

注：*N*为数浓度(m^{-3})，*Z*为雷达反射率(dBZ)，*R*为雨强($mm\cdot h^{-1}$)，*Q*为液态含水量($g\cdot m^{-3}$)。

图4 不同云系降水粒子各微物理参量统计特征

Fig. 4 Values of microphysical parameters for raindrop spectra at different rainfall events

于其他站点的原因。在对流云降水中，第一类小雨滴数浓度的贡献也是最大的，均超过了60%，其中山顶六盘山站点占比最小，然而第一类小雨滴对雨强的贡献却不是最大的，均在30%以下，第二类雨滴对雨强的贡献是最大的，山顶六盘山站点第四类大雨滴占比最大，对雨强贡献也最大。

2.2 不同降水性质的雨滴谱分布特征及Gamma函数拟合

Gamma分布模型由于引入了形状参数μ，更接近真实雨滴谱分布情况，拟合效果优于M-P分布模型。由图6可以看出，层状云降雨的滴谱谱宽最窄，其中六盘山站点为6.5 mm最大，陈靳站点最小为3.75 mm；对流云和积层混合云降雨的谱宽较宽，均为7.5 mm。层状云中，大湾站点在小滴端($D<1$ mm)数密度最大，这是由于大湾站点海拔高度最低，雨滴在下落过程中破碎作用明显，六盘山站点在$D>1$ mm的雨滴数密度大于其他站点；西坡城关较陈靳站点海拔高度略高，东坡惠台较大湾站点海拔高度略高，惠台和城关站点的小滴端($D<1$ mm)数密度小于陈靳和大湾站点，但$D>1$ mm的数密度则大于陈靳和大湾站点。积层混合云中，六盘山站点在大滴端($D>3$ mm)数密度大于其他站点，而大湾站点在小滴端($D<1$ mm)数密度大于其他站点；对流云中，陈靳站点在直径<3 mm范围的雨滴数密度最大，大滴端($D>3$ mm)六盘山和陈靳站点数密度差异甚微，东坡的惠台和大湾站点雨滴数密度明显低于其他站点。总体来看，Gamma分布拟合效果呈现出层状云>积层混合云>对流云的特点，层状云和积层混合云相关性普遍在0.94以上，对流云除大湾站点相关性为0.84，其他站点均在0.93以上。

利用3、4、6阶距法计算了Gamma函数的N_0、μ、λ三个参数，表4列出了各站点不同云系降雨的Gamma谱参数均值。N_0为截断参数，普遍表现为层状云N_0较大，对流云的N_0最小，说明层状云小雨滴数浓度较多。斜率参数λ表征了雨滴谱拟合曲线的倾斜程度，即降水粒子浓度随直径增大而减小的速率，λ越小，曲线越缓，谱宽则较宽。在六盘山区，普遍层状云的λ较大，对流云最小，积层混合云居中，这与实况观测到的层状云雨滴尺度较小、对流云雨滴尺度较大的事实相吻合。形状因子μ表征了拟合曲线弯曲特性，$\mu>0$曲线表现为向上弯曲，$\mu<0$曲线表现为向下弯曲，μ值越大表示弯曲程度越大。从μ均值特征来看，μ值平均值均大于0，表现为向上弯曲，各站点μ值普遍表现为层状云最大，对流云最小，说明对流云拟合曲线的弯曲程度较小，表现在大滴端的数密度较大。N_0、μ、λ三个参数基本随着

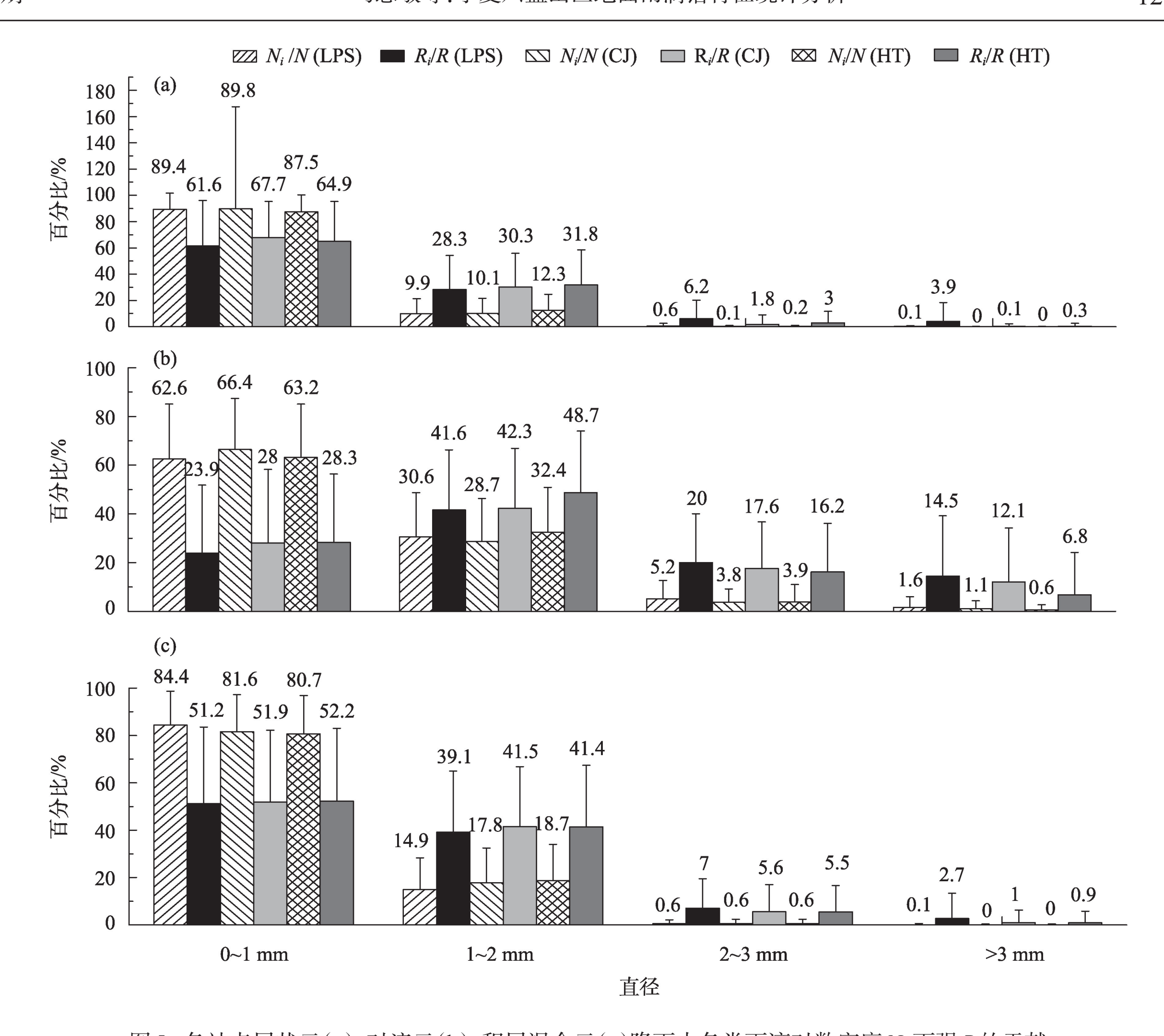


图5 各站点层状云(a)、对流云(b)、积层混合云(c)降雨中各类雨滴对数密度N、雨强R的贡献

Fig. 5 Contributions to number concentration N, rain rate R from different sizes of raindrops at each site: (a) stratiform rainfall; (b) cumulonimbus rainfall; (c) stratocumulus rainfall

海拔高度的升高而减少,表明了高海拔处的小滴端数浓度较少、大滴端数浓度较大,谱宽也更宽。利用2、3、4阶距法[27]也得到了与上述相同的结论。

不同降水类型、气候特征的Gamma分布拟合参数μ-λ关系是不同的[28]。为了进一步研究六盘山区不同云系的μ-λ关系,利用3、4、6阶距法得出的N_0、μ和λ参数,对不同云系的Gamma分布的μ-λ关系进行了拟合,发现μ和λ具有较好的正相关关系,拟合结果如表5。由表5可以看出:各云系降雨的μ-λ均服从二项式关系;μ-λ拟合曲线的斜率均大于0,各站点的μ-λ拟合曲线的斜率均表现为:层状云>积层混合云>对流云,在定义中,$D_m=(\mu+4)/\lambda$,层状云的斜率最大,说明D_m最小,斜率与降水类型密切相关。

2.3 不同降水性质的雨滴微物理特征参量分布

雨滴质量加权平均直径D_m和广义截距参数N_w能反映雨滴的数浓度和尺度的总体情况[29]。为了比较六盘山区不同云系、不同地形位置的雨滴谱差异,统计了所有样本的D_m-N_w的分布,并且按照雨强大小进行了区分。图7为$\lg N_w$-D_m散点分布,可以看出:广义截距参数N_w表现为随着质量加权平均直径D_m的增加而减小,且散点集中区域在D_m较小的一端,说明尺度较小的雨滴占比多;随着雨强的增大,$\lg N_w$-D_m散点"向上向右"延伸,广义截距参数N_w和质量加权平均直径D_m均呈现增大趋势;同一站点,对流云和积层混合云的雨滴粒子的数浓度和尺度明显比层状云大;六盘山站点$\lg N_w$-D_m散点主要分布在$\lg N_w\approx0.5$~4.5和$D_m\approx0.5$~6.0,陈靳站点散点主要分布在$\lg N_w\approx1.2$~4.5和$D_m\approx0.5$~5.0,城关站点散点主要分布在$\lg N_w\approx1.3$~4.4和$D_m\approx0.6$~4.5,大湾站点散点主要分布在$\lg N_w\approx1.2$~4.8和$D_m\approx0.56$~4.1,惠台站点散点

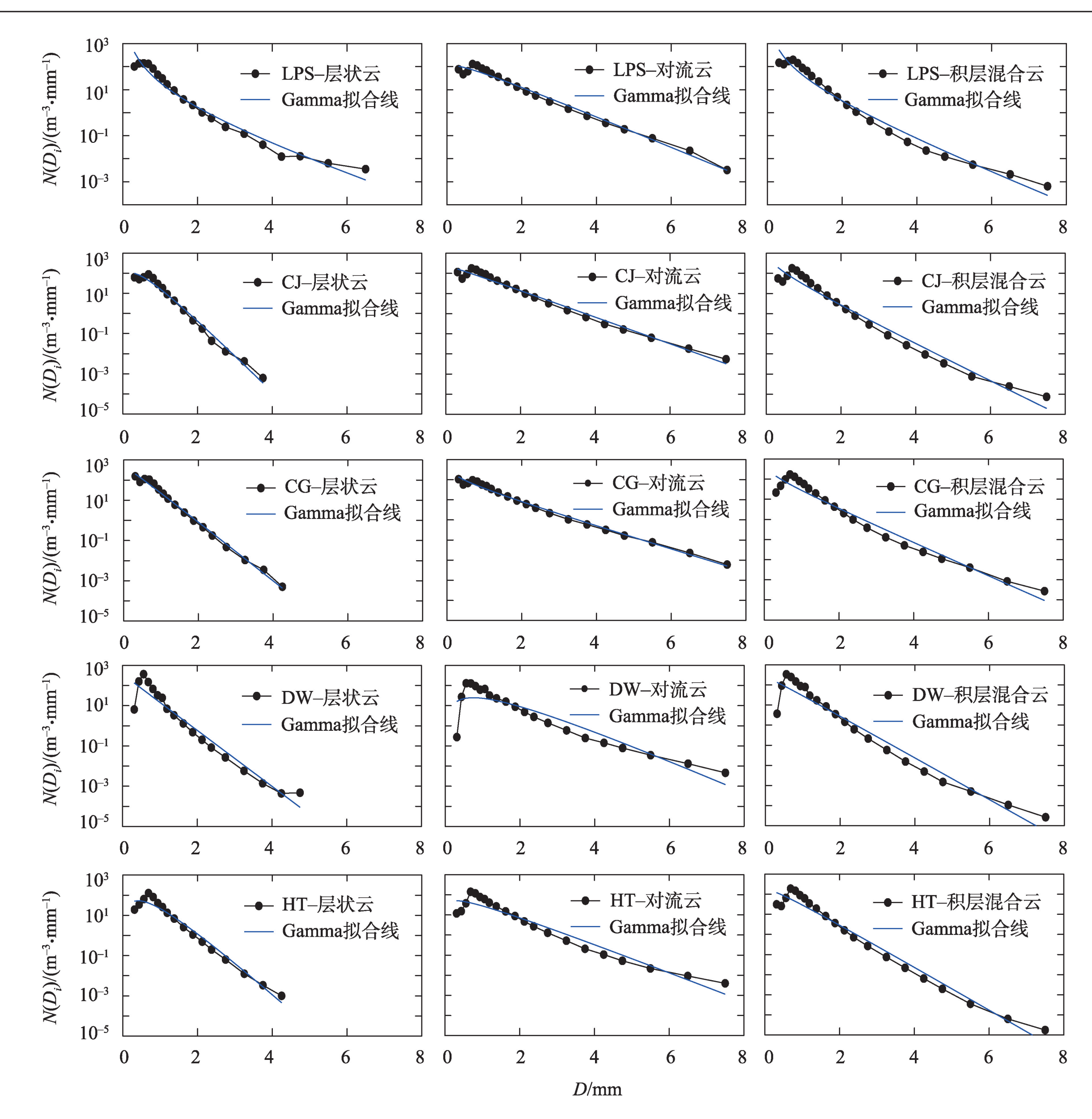


图6 观测站点不同云系平均雨滴谱分布与Gamma拟合曲线

Fig. 6 Raindrop size distributions and Gamma-distribution fitting curves for different rainfall events at three stations

表4 观测站点雨滴谱Gamma分布函数对应的拟合参数

Tab. 4 Fit parameters of the Gamma distribution function fitted to raindrop spectrum at the five stations

站点	层状云			对流云			积层混合云		
	$\lg N_0$	μ	λ	$\lg N_0$	μ	λ	$\lg N_0$	μ	λ
六盘山	10.3	14.7	25.4	5.8	10.7	12.4	8.3	11.8	19.4
陈靳	12.0	19.1	29.4	6.7	11.9	15.0	9.9	16.0	23.8
城关	12.1	18.6	35.3	5.8	10.8	13.2	9.3	14.3	21.6
大湾	23.9	40.2	75.1	8.2	15.5	20.4	13.1	23.6	39.7
惠台	13.9	23.7	36.3	7.1	13.2	15.4	10.7	18.2	26.4

主要分布在$\lg N_w \approx 1.5\sim4.5$和$D_m \approx 0.5\sim4.0$，山顶较山脚站点$\lg N_w$-$D_m$散点“向下向右”延伸，这是由于山顶站点水汽充沛，雨滴的蒸发、破碎过程不明显，导致雨滴数浓度减小而平均尺度增大。

2.4 不同环流形势的雨滴微物理参量特征

不同降水性质的雨滴谱特征存在显著差异，不

表5　观测站点雨滴谱Gamma分布μ-λ关系（$\lambda=a\mu^2+b\mu+c$）拟合结果

Tab. 5　Fitting results for the μ-λ relationship of the Gamma distribution function at the stations

站点	层状云			对流云			积层混合云		
	a	b	c	a	b	c	a	b	c
六盘山	−0.0015	1.76	0.25	0.0028	1.06	0.10	0.0003	1.54	1.09
陈靳	0.0008	1.36	2.89	0.0015	1.26	−0.67	0.0002	1.47	0.004
城关	0.0015	1.94	−2.78	0.0022	1.19	−0.51	0.0005	1.47	0.27
大湾	−0.0003	1.93	−1.44	0.0009	1.42	−2.45	0.0002	1.48	0.15
惠台	−0.0005	1.54	0.36	0.0028	1.10	0.05	0.0002	1.43	0.05

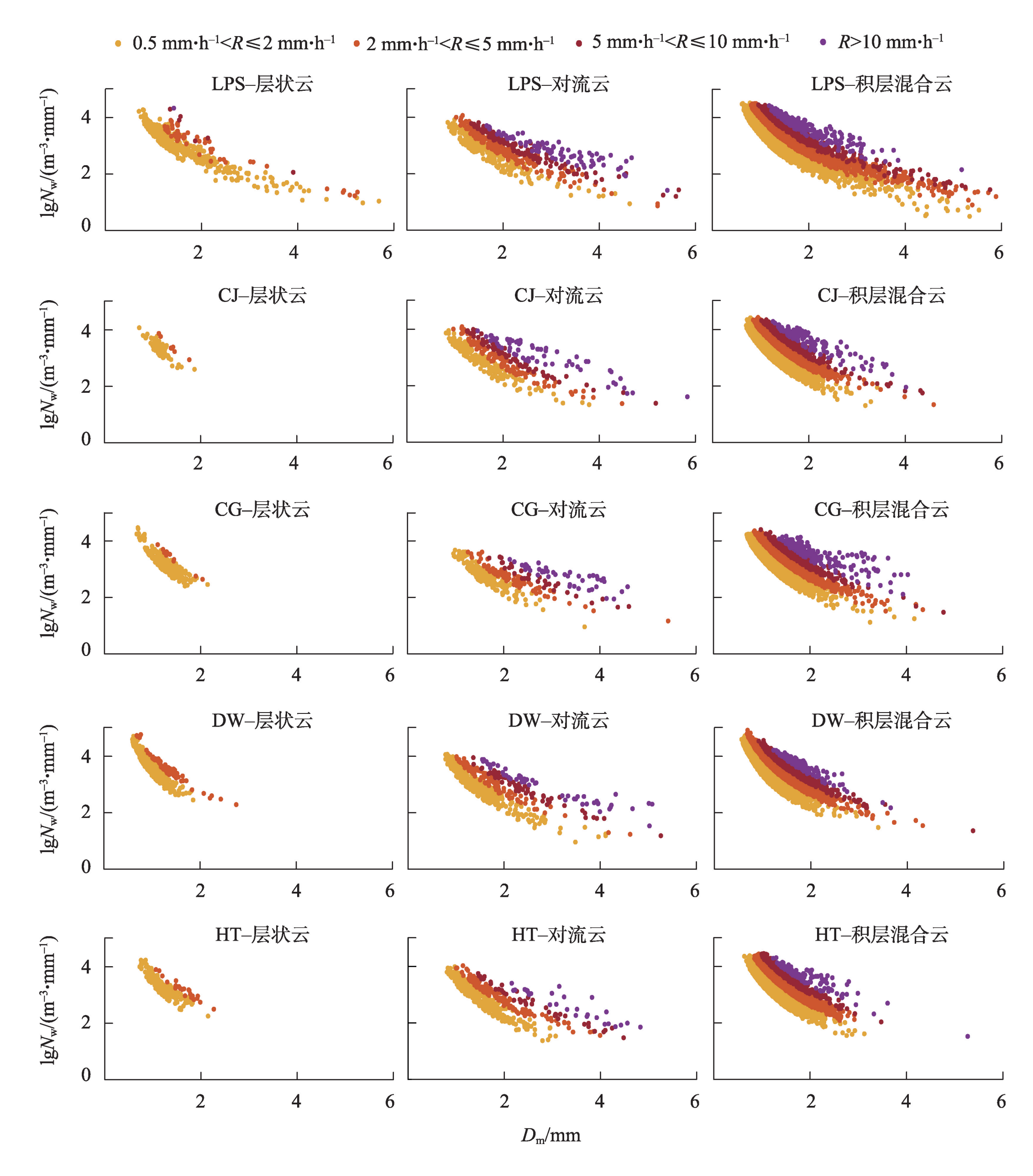


图7　观测站点不同云系降雨的$\lg N_w$-D_m的散点分布

Fig. 7　Scatterplot of $\lg N_w$ versus D_m for different rainfall events at three stations

同环流形势的雨滴谱特征也存在明显差异。我们根据500 hPa的大气环流形势，将58次降雨过程分为东高西低型、西北气流型和平直气流型3类，将5个雨滴谱站点的所有样本进行平均后，其平均雨滴谱微物理参量如表6所示。由表6可以看出，三种环流形势中，西北气流型的各特征直径（D_{ave}、D_{max}、

表6 3种环流形势的雨滴各微物理参量及Gamma分布函数的谱参数的统计特征

Tab. 6 Spectral parameter and physical feature of RDSD varied with circulation patterns

天气类型	D_{ave}	D_{max}	D_m	D_{mode}	N	Z	R	Q	$\lg N_0$	μ	λ
东高西低型	0.77	1.68	1.05	0.65	109.07	16.48	0.94	0.05	10.87	17.85	28.48
西北气流型	0.82	1.89	1.17	0.69	113.29	19.14	1.30	0.06	9.21	14.56	22.03
平直气流型	0.76	1.59	1.02	0.65	74.21	14.54	0.50	0.03	11.52	19.69	31.67

D_m、D_{mode})及各微物理参量(N、Z、R、Q)均为最大,这也是由于对流云降雨个例中西北气流型占比最多,平直气流型的各特征直径及各微物理参量最小,东高西低型居中。此外,对三种环流形势的Gamma分布函数的谱参数进行了平均,发现西北气流型的N_0、μ、λ最小,而平直气流型的各谱参数最大,这与不同环流形势下的降水性质具有紧密相关性。以上结论与宁夏于1982—1984年在盐池、吴忠、同心、中宁、海原、银川、石嘴山利用吸水滤纸色斑法得出的雨滴平均谱特征量不同[9],即平直气流型的平均微物理参量(Q、Z、I)最大,而M-P分布的谱参数(N_0、λ)最小,这可能与地域差异、地形作用、气候变化等因素有关。

3 结 论

针对六盘山区2020—2021年58次降雨过程的不同站点激光雨滴谱仪数据,经过数据质控和计算,分析了层状云、对流云、积层混合云三类降雨的微物理参量、雨滴谱平均特征以及Gamma分布参数等,得到以下几点结论:

(1) 六盘山区同一站点的各微物理参量以及特征直径均值表现为:对流云>积层混合云>层状云;层状云和积层混合云中,山顶较山脚站点其众数直径小,而最大直径和质量加权平均直径大,可能由于山顶距离云底较近或者可能在云中、雨滴的蒸发、破碎过程不明显;随着海拔高度的升高,最大直径D_{max}、质量加权平均直径D_m逐渐增大,而平均直径D_{ave}和众数直径D_{mode}在山腰处较大,山顶和山底较小;东坡站点的雨强R、雷达反射率Z、液态含水量Q比西坡大,且随着海拔高度的升高,东、西坡两侧的R、Z、Q逐渐增大。

(2) 层状云和积层混合云小雨滴对于雨强和数浓度的贡献均为最大,对流云小雨滴对数浓度贡献最大,但中等雨滴对雨强的贡献最大。

(3) 层状云降雨的滴谱谱宽最窄,对流云和积层混合云降雨的谱宽较宽;层状云的Gamma分布拟合效果优于积层混合云和对流云;Gamma分布模型的N_0、μ、λ三个参数针对不同云系降雨呈现出不同特征,N_0、μ、λ三个参数基本随着海拔高度的升高而减少,μ-λ拟合曲线的斜率与降水类型密切相关。

(4) N_w随着D_m的增加而减小,$\lg N_w$-D_m散点集中在D_m较小的一端;随着雨强的增大,N_w和D_m呈增大趋势;山顶站点雨滴粒子数浓度N_w较山脚站点有所减小,而平均尺度D_m增大。

(5) 西北气流型的雨滴谱各特征直径参量及各微物理参量大于东高西低型和平直气流型,这与不同环流形势下的降水性质具有紧密相关性。

参考文献(References):

[1] 朱亚乔, 刘元波. 地面雨滴谱观测技术及特征研究进展[J]. 地球科学进展, 2013, 28(6): 685-694. [Zhu Yaqiao, Liu Yuanbo. Advances in measurement techniques and statistics features of surface raindrop size distribution[J]. Advances in Earth Science, 2013, 28(6): 685-694.]

[2] 宫福久, 刘吉成, 李子华. 三类降水云雨滴谱特征研究[J]. 大气科学, 1997, 21(5): 607-614. [Gong Fujiu, Liu Jicheng, Li Zihua. Study of the raindrop size distributions for three types of precipitation[J]. Chinese Journal of Atmospheric Sciences, 1997, 21(5): 607-614.]

[3] 房彬, 班显秀, 郭学良, 等. 雷达—雨量计—粒子激光探测仪联合估算降水量[J]. 大气科学, 2010, 34(4): 513-519. [Fang Bin, Ban Xianxiu, Guo Xueliang, et al. Area rainfall estimation by using radar, raingauge, and particle laser-based optical measurement instrument[J]. Chinese Journal of Atmospheric Sciences, 2010, 34(3): 513-519.]

[4] Marshall J S, Palmer W M K. The distribution of raindrops with size[J]. Journal of Meteorology, 1948, 5: 165-166.

[5] Ulbrich C W. Natural variations in the analytical form of the raindrop size distribution[J]. Journal of Climate and Applied Meteorology, 1983, 22: 1764-1775.

[6] 陈宝君, 李子华, 刘吉成, 等. 三类降水云雨滴谱分布模式[J]. 气象学报, 1998, 56(4): 506-512. [Chen Baojun, Li Zihua, Liu Jicheng, et al. Model of raindrop size distribution in three types of precipitation[J]. Acta Meteorologica Sinica, 1998, 56(4): 506-512.]

[7] 房彬, 郭学良, 肖辉. 辽宁地区不同降水云系雨滴谱参数及其特征量研究[J]. 大气科学, 2016, 40(6): 1154−1164. [Fang Bin, Guo Xueliang, Xiao Hui. A study on characteristics of spectral parameters and characteristic variables of raindrop size distribution for different cloud systems in Liaoning Province[J]. Chinese Journal of Atmospheric Sciences, 2016, 40 (6): 1154−1164.]

[8] 周黎明, 王俊, 龚佃利, 等. 山东三类降水云雨滴谱分布特征的观测研究[J]. 大气科学学报, 2014, 37(2): 216−222. [Zhou Liming, Wang Jun, Gong Dianli, et al. A study on the distribution of raindrop size in three types of precipitation in Shandong Province [J]. Transactions of Atmospheric Sciences, 2014, 37(2): 216−222.]

[9] 牛生杰, 安夏兰, 桑建人. 不同天气系统宁夏夏季降雨谱分布参量特征的观测研究[J]. 高原气象, 2002, 21(1): 37−44. [Niu Shengjie, An Xialan, Sang Jianren. Observational research on physical feature of summer rain dropsize distribution under synoptic systems in Ningxia[J]. Plateau Meteorology, 2002, 21(1): 37−44.]

[10] 张玉欣, 韩辉邦, 郭世钰, 等. 祁连山南麓夏季不同降水云系雨滴谱特征及其 *Z*-*R* 关系[J]. 干旱区研究, 2021, 38(4): 1048−1057. [Zhang Yuxin, Han Huibang, Guo Shiyu, et al. Statistical characteristics of raindrop size distribution and its *Z*-*R* relationship for different precipitation clouds in summer in the Qilian Mountains[J]. Arid Zone Research, 2021, 38(4): 1048−1057.]

[11] 王昀, 王旭, 廖飞佳, 等. 新疆天山山区降雨的微物理结构特征[J]. 冰川冻土, 2018, 40(4): 695−701. [Wang Yun, Wang Xu, Liao Feijia, et al. Micro-structural characteristics of raindrop spectra of precipitation in the Tianshan Mountains[J]. Journal of Glaciology and Geocryology, 2018, 40(4): 695−701.]

[12] 李慧, 银燕, 单云鹏, 等. 黄山层状云和对流云降水不同高度的雨滴谱统计特征分析[J]. 大气科学, 2018, 42(2): 268−280. [Li Hui, Yin Yan, Shan Yunpeng, et al. Statistical characteristics of raindrop size distribution for stratiform and convective precipitation at different altitudes in Mt. Huangshan[J]. Chinese Journal of Atmospheric Sciences, 2018, 42(2): 268−280.]

[13] 陈聪, 银燕, 陈宝君. 黄山不同高度雨滴谱的演变特征[J]. 大气科学学报, 2015, 38(3): 388−395. [Chen Cong, Yin Yan, Chen Baojun. Raindrop size distribution at different altitudes in Mt. Huang[J]. Transactions of Atmospheric Sciences, 2015, 38(3): 388−395.]

[14] 张昊, 濮江平, 李靖, 等. 庐山地区不同海拔高度降水雨滴谱特征分析[J]. 气象与减灾研究, 2011, 34(2): 43−50. [Zhang Hao, Pu Jiangping, Li Jing, et al. Analysis of characteristics of raindrop size distribution at different altitudes in Lushan[J]. Meteorology and Disaster Reduction Research, 2011, 34(2): 43−50.]

[15] 程鹏, 常祎, 刘琴, 等. 祁连山春季一次层状云降水的雨滴谱分布及地形影响特征[J]. 大气科学, 2021, 45(6): 1232−1248. [Cheng Peng, Chang Yi, Liu Qin, et al. A case study of raindrop size distribution and orographic impact characteristics in spring stratiform precipitation over the Qilian Mountains[J]. Chinese Journal of Atmospheric Sciences, 2021, 45(6): 1232−1248.]

[16] 李山山, 王晓芳, 万蓉, 等. 青藏高原东坡不同海拔区域的雨滴谱特征[J]. 高原气象, 2020, 39(5): 899−911. [Li Shanshan, Wang Xiaofang, Wan Rong, et al. The characteristics of raindrop spectrum in different altitude region on the eastern slope of Qinghai-Xizang Plateau[J]. Plateau Meteorology, 2020, 39(5): 899−911.]

[17] 石建周, 刘贤德, 田青, 等. 六盘山半干旱区华北落叶松林坡面土壤含水量的降雨响应[J]. 干旱区研究, 2023, 40(4): 594−604. [Shi Jianzhou, Liu Xiande, Tian Qing, et al. Rainfall response of soil water content on a slope of *Larix principis-rupprechtii* plantation in the semi-arid Liupan Mountains[J]. Arid Zone Research, 2023, 40(4): 594−604.]

[18] 邓佩云, 桑建人, 杨萌, 等. 近30年六盘山东与西坡降水及空中水汽条件差异特征分析[J]. 气象科技, 2021, 49(1): 77−85. [Deng Peiyun, Sang Jianren, Yang Meng, et al. Analysis of different characteristics of precipitation and air water vapor conditions over east and west slopes of Liupan Mountain in recent 30 years [J]. Meteorological Science and Technology, 2021, 49(1): 77−85.]

[19] 陶涛, 张立新, 桑建人, 等. 六盘山区一次非典型冰雹天气过程微物理量特征的分析[J]. 干旱区地理, 2020, 43(2): 299−307. [Tao Tao, Zhang Lixin, Sang Jianren, et al. A case analysis of microphysical characteristics of atypical hail formation over Liupan Moutain, China[J]. Arid Land Geography, 2020, 43(2): 299−307.]

[20] 曹宁, 张立新, 桑建人, 等. 基于微雨雷达的六盘山区地形云降水宏微观特征观测分析[J]. 气象科学, 2019, 39(6): 775−785. [Cao Ning, Zhang Lixin, Sang Jianren, et al. Observation and analysis on the macroscopic and microcosmic characteristics of topography, cloud and precipitation in Liupan Mountain area based on micro rain radar[J]. Journal of the Meteorological Sciences, 2019, 39(6): 775−785.]

[21] 杜波, 马舒庆, 刘达新, 等. 雨滴谱降水现象仪综合测试系统设计[J]. 气象科技, 2018, 46(1): 56−63. [Du Bo, Ma Shuqing, Liu Daxin, et al. Design and study of raindrop spectrum precipitation phenomenon instrument[J]. Meteorological Science and Technology, 2018, 46(1): 56−63.]

[22] Tokay A, Bashor P G. An experimental study of small-scale variability of raindrop size distribution[J]. Journal of Applied Meteorology and Climatology, 2010, 49(11): 2348−2365.

[23] Atlas D, Srivastava R C, Sekhon R S. Doppler radar characteristics of precipitation at vertical incidence[J]. Reviews of Geophysics and Space Physics, 1973, 11(1): 1−35.

[24] 黄兴友, 印佳楠, 马雷, 等. 南京地区雨滴谱参数的详细统计分析及其在天气雷达探测中的应用[J]. 大气科学, 2019, 43(3): 691−704. [Huang Xingyou, Yin Jianan, Ma Lei, et al. Comprehensive statistical analysis of rain drop size distribution parameters and their application to weather radar measurement in Nanjing[J]. Chinese Journal of Atmospheric Sciences, 2019, 43(3): 691−704.]

[25] 史晋森, 张武, 陈添宇, 等. 2006年夏季祁连山北坡雨滴谱特征[J]. 兰州大学学报(自然科学版), 2008, 44(4): 60−66. [Shi Jinsen, Zhang Wu, Chen Tianyu, et al. Raindrop-size distribution charac-

teristics of the northern face of Qilian Mountains in the summer of 2006[J]. Journal of Lanzhou University (Natural Sciences Edition), 2008, 44(4): 60–66.]

[26] 李岩瑛, 张强, 许霞, 等. 祁连山及周边地区降水与地形的关系[J]. 冰川冻土, 2010, 32(1): 52–61. [Li Yanyin, Zhang Qiang, Xu Xia, et al. Relationship between precipitation and terrain over the Qilian Mountains and their ambient areas[J]. Journal of Glaciologyand Geocryology, 2010, 32(1): 52–61.]

[27] 郑娇恒, 陈宝君. 雨滴谱分布函数的选择: M-P和Gamma分布的对比研究[J]. 气象科学, 2007, 27(1): 17–25. [Zheng Jiaoheng, Chen Baojun. Comparative study of exponentail and Gamma functional fits to observed raindrop size distribution[J]. Scientia Meteorologica Sinica, 2007, 27(1): 17–25.]

[28] Wang M J, Zhao K, Xue M, et al. Precipitation microphysics characteristics of a Typhoon Matmo(2014) rainband after landfall over eastern China based on polarimetric radar observations[J]. Journal of Geophysical Research: Atmospheres, 2016, 121(20): 12415–12433.

[29] Zhang G F, Vivekanandan J, Brandes E A, et al. The shape-slope relation in observed gamma raindrop size distributions: Statistical error or useful information?[J]. Journal of Atmospheric and Oceanic Technology, 2003, 20(8): 1106–1119.

Statistics and analysis of surface raindrop spectrum characteristics in Liupan Mountain area of Ningxia

MA Simin[1,2], SHU Zhiliang[1,2], CHANG Zhuolin[1,2], ZHOU Nan[1,2], LIU Shijun[3]

(1. Key Laboratory for Meteorological Disaster Monitoring and Early Warning and Risk Management of Characteristic Agriculture in Arid Regions, CMA, Yinchuan 750002, Ningxia, China; 2. Key Laboratory of Meteorological Disaster Preventing and Reducing of Ningxia, Yinchuan 750002, Ningxia, China; 3. Wuhai Meteorological Bureau, Wuhai 016000, Inner Mongolia, China)

Abstract: The microphysical parameters, average characteristics of raindrop spectra, and gamma distribution parameters of three types of rainfall (stratiform, cumulonimbus, and stratocumulus) were analyzed using raindrop spectrum data from different stations of 58 rainfall processes in the Liupan Mountains from 2020 to 2021. The results are as follows: (1) The mean values for all microphysical parameters at each station were higher for cumulonimbus rainfall compared to stratocumulus and stratiform rainfall. In stratiform and stratocumulus rainfall, the mean diameter (D_{ave}) and mode diameter (D_{mode}) were smaller at the top and bottom of the mountain and greater on the mountainside. Conversely, the maximum diameter (D_{max}), mass- weighted mean diameter (D_{mode}), rain rate (R), radar reflectivity (Z), and liquid water content (Q) increased with elevation on the east and west slopes. (2) The contributions of small raindrops to rain rate (R) and number concentration (N) were higher in stratiform and stratocumulus rainfall than in cumulonimbus rainfall. However, the contributions of small and medium-sized raindrops to N and R, respectively, were higher in cumulonimbus rainfall than in stratiform and stratocumulus rainfall. (3) The N_0, μ, and λ parameters of gamma distribution decreased with an increase in altitude. The slope of the μ-λ fitting curve was closely related to the type of rainfall. (4) Compared with the foot of the mountain sites, the peak site exhibited a decrease in raindrop number concentration (N_w) and an increase in mean scale (D_m). (5) The characteristic diameter and microphysical parameters varied under different circulation situations.

Keywords: Liupan Mountains; raindrop spectrum; microphysical parameters; Gamma distribution